Aus dem Institut und der Klinik
für Medizinische Strahlenkunde
der Universität Düsseldorf

(Direktor: Prof. Dr. med. Heinz Vieten)

Einsatz von LiF - Thermolumineszenzdosimetern zu Dosismessungen in der Röntgenstrahlentherapie

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin.

Der Medizinischen Fakultät der Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Hans Quast

1982

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41535714_0043

Aus dem Institut und der Klinik
für Medizinische Strahlenkunde
der Universität Düsseldorf

(Direktor: Prof. Dr. med. Heinz Vieten)

Einsatz von LiF- Thermolumineszenzdosimetern zu Dosismessungen in der Röntgenstrahlentherapie

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin.
Der Medizinischen Fakultät der Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Hans Quast

1982

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen
Fakultät der Universität Düsseldorf

Der Dekan der Medizinischen Fakultät
der Universität Düsseldorf
gez.: Prof. Dr. Arnold

Referent
gez.: Prof. Dr. Günther

Korreferent
gez.: Prof. Dr. Jungblut

INHALTSVERZEICHNIS

1.	*Einleitung*	1
2.	*Physikalische Grundlagen der Thermolumineszenzdosimetrie*	4
3.	*Meßaufbau*	7
4.	*Meßergebnisse*	
4.1.	*Statistische Verteilung bei Einstrahlung einer konstanten Dosis und konstanter Strahlenqualität*	1o
4.2.	*Möglicher Einfluß der Strahlenqualität auf die Statistische Verteilung*	12
4.3.	*Abhängigkeit des Ansprechvermögens von der Strahlenqualität*	12
4.4.	*Abhängigkeit der Meßwertanzeige von der Zeitspanne zwischen Bestrahlung und Auswertung*	2o
4.5.	*Wiederverwendungsmöglichkeit der TLD's*	24
4.6.	*Dosisleistungsabhängigkeit des Meßwertes*	26
4.7.	*Individuelles Ansprechvermögen der TL-Dosimeter*	26
5.	*Diskussion*	3o
6.	Zusammenfassung	35

LITERATUR

Einsatz von LiF- Thermolumineszenzdosimetern zu Dosismessungen in der Röntgenstrahlentherapie

1. Einleitung

Alle Einrichtungen, die konventionelle Röntgenstrahlentherapie erlauben - darunter fallen Oberflächen-, Körperhöhlen-, Halbtiefen- und Tiefentherapie - unterliegen rechtlich der Röntgenverordnung (RöV).

§ 13 Abs. 1 der RöV enthält folgende Forderungen:

1) Bei der Aufstellung einer Röntgeneinrichtung zu Therapiezwecken und nach Änderung derselben, welche die Dosisleistung im Nutzstrahlenbündel des Strahlers beeinflussen kann, ist die Dosisleistung unter Berücksichtigung der Betriebsbedingungen zu messen. Die Meßergebnisse sind aufzuzeichnen.

2) Halbjährlich müssen sich Messungen anschließen, die die oben genannten Aufzeichnungen überprüfen können. Dies ist nicht erforderlich, wenn die Dosis während der Behandlung fortlaufend gemessen wird.

Nach § 13 Abs. 2

müssen die oben genannten Messungen mit einem Dosimeter erfolgen, das alle 2 Jahre an eine Primär- oder Sekundärstandardeinrichtung meßtechnisch angeschlossen worden ist /1/, /2/, /3/.

Im Land NW werden mehrere hundert konventionelle Röntgentherapieeinrichtungen betrieben, die den Bestimmungen des § 13 unterliegen.
Für die Durchführung der Messungen kommen zwei Möglichkeiten in Betracht:

1) Der Betreiber selbst führt die Messungen durch.

2) Ein Dritter wird mit den Messungen betraut.

Da die Ärzte z.B. wegen der relativ hohen Kosten der Meßgeräte oder mangelndem physikalischen Fachwissen nur in wenigen Fällen die Messungen selbst durchführen, werden in der Regel Dritte diese Aufgabe übernehmen. Das sind im wesentlichen die Technischen Überwachungsvereine, Krankenhausphysiker und im Land NW auch behördliche Stellen, wie z.B. die Zentralstelle für Sicherheitstechnik (ZfS), Düsseldorf /4/, /5/.

Nachteil der Nachdosimetrierungen sind die hohen Kosten für den Betreiber, die sich aus dem großen technischen Aufwand für Transport und Auf- bzw. Abbau der zahlreichen Meßgeräte ergeben.
Hinzu kommen noch Kosten für die Hin- und Rückfahrt /2/.

Die Möglichkeit, den hohen technischen und kostenmäßigen Aufwand zu reduzieren, ist durch den Einsatz von Thermolumineszenzdosimetern (TLDs) für die Nachdosimetrierungen gegeben.
Nach einer gewissen Einführungs- und Erprobungszeit wurde von der ZfS begonnen, die TLDs mit genauer Anleitung an die Betreiber zu senden, die sie nach dieser Anweisung bestrahlen und zur Auswertung an die ZfS zurückschicken.

Die Bestimmungen des § 13 Abs. 2 der RöV sind auch erfüllt, da aus dem zur Verfügung stehenden TLD- Kollektiv in etwa monatlichem Abstand immer so viele an eine Standardeinrichtung der ZfS angeschlossen werden, daß innerhalb von 2 Jahren jedes TLD einmal davon betroffen sein wird /2/, /6/.

Im Land NW besitzt die ZfS eine behördlich anerkannte Sekundärstandardeinrichtung mit einem Duplex- Dosimeter der Fa. PTW, Freiburg, und der Möglichkeit, verschiedene Strahlenqualitäten bei Röhrenspannungen von 1o kV bis 3oo kV einzustellen.

In dieser Arbeit wird das Verhalten von TLDs aus Lithiumfluorid (LiF) bei Dosimetrierungen im Rahmen des § 13 RöV untersucht.
Alle Messungen wurden im Röntgen- und TLD- Labor des ZfS durchgeführt.

2. Physikalische Grundlagen der Thermolumineszenzdosimetrie

Kristallstrukturen verschiedener Materialien emittieren nach Bestrahlung mit ionisierenden Strahlen oder ultraviolettem Licht bei thermischer Stimulierung sichtbares Licht, dessen Intensität der eingestrahlten Dosis weitgehend proportional ist.
Durch die Bestrahlung werden Elektronen innerhalb der Kristallstruktur freigesetzt. Sie können zu Fremdatomen oder zu Gitterfehlstellen gelangen, wo sie eingefangen werden ("Trapping"). Die Anzahl der auf diese Weise gebundenen Elektronen steigt proportional zur eingestrahlten Dosis.

Die Bindungsenergie einiger Elektronen ist so gering, daß diese schon bei Zimmertemperatur freigesetzt werden und damit für die gespeicherte Dosisinformation verloren gehen. Dieser Vorgang heißt Fading.
Die in dem Zeitraum zwischen Bestrahlung und Auswertung nicht durch Fading freigesetzten Elektronen können im Falle der Thermolumineszenz erst durch thermische Stimulierung, d.h. Erhitzung auf mehrere $100^{o}C$, freigesetzt werden. Wird das dabei emittierte Licht als Funktion der Temperatur registriert, so erhält man eine Thermolumineszenz-Kurve ("Glowkurve"), die für das betreffende Material (z.B.LiF) charakteristisch und für jedes Dosimeter reproduzierbar ist. Spitzen innerhalb einer Glowkurve heißen Glowpeaks (z.B. bei LiF um $210^{o}C$).
Die Registrierung erfolgt mit einem Sekundärelektronenvervielfacher ("Photomultiplier"), welcher den einfallenden

"Lichtstrom" in einen Elektronenstrom umsetzt, der dosisproportional ist. In Thermolumineszenzdosimeter- Auswertegeräten wird je nach Prinzip entweder die Höhe der Glowpeaks oder ihre Fläche als Lichtintensität angegeben.

Zur Vermeidung hoher Fadingeffekte muß eine hinreichende Stabilität der gebundenen Elektronen im Kristall nicht nur bei Raumtemperatur sondern auch bei Lagerungstemperaturen bis zu etwa 4o°C gegeben sein. Die Glowtemperatur sollte deshalb weit darüber liegen (in der Praxis mindestens 18o°C).

Da zusätzlich durch das Aufheizen der Dosimeter noch ein Infrarotuntergrundspektrum emittiert wird, dürfen die Emissionswellenlängen nicht zu lang sein, um nicht überhöhte Meßwerte zu registrieren. Geeignet sind Emissionsmaxima zwischen 3oo und 5oo nm.
Form und Lage der Glowpeaks sowie die TL- Lichtsumme werden auch durch die Aufheizungsgeschwindigkeit beeinflußt; der normale Arbeitsbereich liegt zwischen 1 und 25°C/s.

LiF und CaF_2 sind die gebräuchlichsten TL- Materialien und werden meist in Stäbchen- oder Plättchenform vertrieben. Hersteller der in dieser Arbeit benutzten LiF- Plättchen (Maße: 3,18 x 3,18 x o,89 mm) ist die Fa. Harshaw ("TLD 1oo"). Das Auswertegerät stammt von der Fa. Eberline ("TLR- S"). Es wird über eine Referenzlichtquelle kalibriert. Eine Stickstoff- Schutzgas- Atmosphäre ist bei der Auswertung

erforderlich, da Sauerstoff durch Oxydationsvorgänge den Auswertevorgang negativ beeinflußt.

Für den Milliröntgen- Bereich (1 Röntgen(R) = 2.58 $1o^{-4}$ C/kg) kann man das Gerät auf den empfindlicheren "LOW- Betrieb und für den Röntgen- Bereich auf den unempfindlicheren "HIGH- Betrieb" schalten /7/, /8/.

3. Meßaufbau

Als Röntgeneinrichtung standen die Materialprüfungsstrahler MG 151 (1o bis 15o kV) und MG 3o1 der Fa. C.H.F. Müller-Philips (1oo bis 3oo kV) zur Verfügung. Die Eigenfilterungen betragen beim MG 151 2,5 mm Be und beim MG 3o1 o,4 mm Cu. Röhrenströme sind von 3 bis 25 mA einstellbar.

In Strahlenrichtung gesehen, enthält der Meßaufbau folgende Elemente:

a) Röntgenstrahler

b) Zusatzfilterung

c) Shutter - *er ermöglicht eine schnelle Unterbrechung der Strahlung ohne den langsamen An- und Abstieg der Röhrenspannung beim Ein- bzw. Ausschalten über den Röntgengenerator.*

d) Monitorkammer - *zum DU3 der Fa. PTW, Freiburg zur Überwachung der Dosisleistung in der Nutzstrahlung.*

e) Blende - *zur Feldgebung auf das*

f) H_2O*-Phantom*

Auf dem H_2O*-Phantom wurde ein rechteckiges Feld ausgemessen und auf Dosishomogenität geprüft.*
Das für alle Messungen verwendete Vergleichsdosimeter auf Ionisationskammerbasis (Duplex- Dosimeter der Fa. PTW) ist an den Primärstandard der PTB, Braunschweig angeschlossen. Es besitzt eine Weichstrahlkammer ("W-Kammer") mit ener-

gieunabhängiger Anzeige von 1o bis 8o kV und eine sog. T-Kammer mit energieunabhängiger Anzeige von 8o bis mindestens 3oo kV. Die Kalibrierung der W- und T-Kammer erfolgt mit einem Sr 9o- Kalibrierstrahler, indem für eine bestimmte Sprungzahl eine Meßzeit ("Sollzeit") vorgegeben und diese mit der am Meßtag registrierten Meßzeit ("Istzeit") verglichen wird.
Insgesamt ergibt sich die Dosisinformation in der Einheit Röntgen durch folgende Gleichung:

$$\text{Sprungzahl am Duplex} \times \text{Kammerfaktor} \times \frac{\text{Istzeit}}{\text{Sollzeit}} = \text{Meßwert in R}$$

Ein Dosimeter auf TLD-Basis besteht aus 3 TLDs, die in einen Legobaustein eingebracht sind. Der Meßwert ensteht jeweils durch Mittelwertbildung.
In dieser Arbeit wurden Messungen zu folgenden Problemstellungen vorgenommen:

1) Bestrahlung eines TLD-Kollektivs mit konstanter Dosis und konstanter Strahlenqualität mit der Fragestellung, ob die statistische Verteilung der Meßwertanzeigen eine Normalverteilung bildet.
2) Bestrahlung desselben Kollektives mit derselben Dosis, aber geänderter Strahlenqualität. Fragestellung: Ergibt sich dieselbe Verteilung oder wird sie von der Strahlenqualität beeinflußt?
3) Abhängigkeit des Kalibrierfaktors (d.h. der Umrechnung der TL-Auswertegeräteanzeige in die Dosiseinheit Röntgen) von Röhrenspannung und Filterung.

4) *Besteht eine Abhängigkeit der Meßwertanzeige von der Zeitspanne zwischen Bestrahlung und Auswertung (Fading)?*

5) *Wiederverwendung der TLDs möglich?*

6) *Dosisleistungsabhängigkeit der Meßwertanzeige vorhanden?*

7) *Nachweis individueller Empfindlichkeit, d.h. besitzen die TLD's ein individuell unterschiedliches Ansprechvermögen und wenn ja, in welcher Größenordnung?*

4. Meßergebnisse

4.1. Statistische Verteilung bei Einstrahlung einer konstanten Dosis und konstanter Strahlenqualität

Insgesamt wurden 777 TLD's unter folgenden Bedingungen bestrahlt:
Röhrenspannung: 1oo kV, Gesamtfilterung: o,4 mm Cu, Röhrenstrom: 17,5 mA, eingestrahlte Dosis: 2o R, Röntgeneinrichtung: MG 3o1

Die Meßergebnisse (Einheit: TL- Auswertegeräteanzeige in Skalenteilen (Skt) wurden in 7 Gruppen eingeteilt, deren Abgrenzungen untereinander in Tab.1 festgesetzt wurden.

Gruppe	Abweichung vom Mittelwert $\bar{N}$	Anzahl der TLD's
1	mit mehr als -2o%	4
2	von -1o% bis -2o%	6o
3	von $-\sqrt{\bar{N}}$ bis -1o%	213
4	von $+\sqrt{\bar{N}}$ bis $-\sqrt{\bar{N}}$	255
5	von +1o% bis $+\sqrt{\bar{N}}$	218
6	von +2o% bis +1o%	26
7	mit mehr als +2o%	1

Tab.1: Einteilung der TLD's in 7 Gruppen

In Abb.1 ist die Zahl der TLD's pro Gruppe gegen die Meßwertanzeige aufgetragen.
Der Mittelwert $\bar{N}$ für alle 777 TLDs errechnet sich zu 1454 Skt. Die Halbwertsbreite (HWB) der Verteilung beträgt 25o Skt, was ungefähr 17% von $\bar{N}$ entspricht.
Zwischen den beiden Wendepunkten der Verteilung, etwa in halber Höhe des Maximums, wird die Halbwertsbreite gleich der doppelten Standardabweichung 2σ gesetzt.

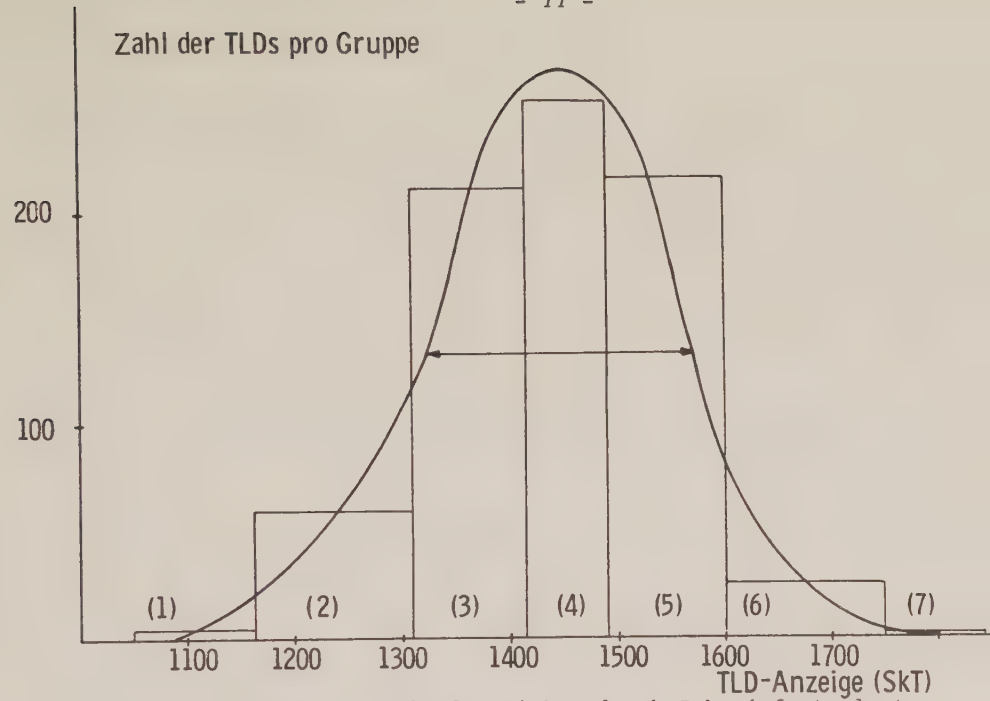


Abb. 1a : Zahl der TLDs in den sieben durch Tab. 1 festgelegten Gruppen (Strahlenqualität: 1oo kV o,4 mm Cu, applizierte Dosis: 2o R, Halbwertsbreite (HWB): 25o SkT (= 17%)

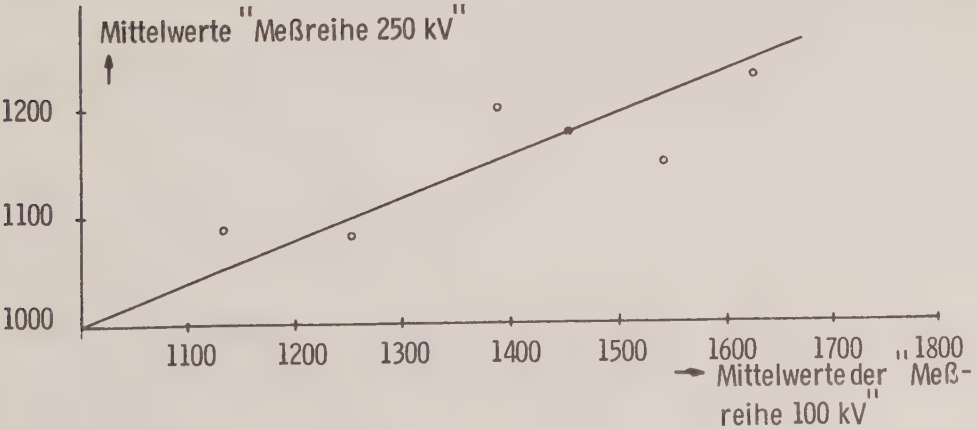


Abb. 1b : Beziehung der Mittelwerte der Gruppen 1 bis 6 beider Meßreihen (1oo kV - s. Abb. 1a - und 25o kV, 2 mm Cu) zueinander (Einzelheiten im Text, S. 11). Die applizierte Dosis betrug 2o R.

Sollte tatsächlich eine Normalverteilung vorliegen, müßten im Bereich von $\bar{N}$ minus 1,96σ und $\bar{N}$ plus 1,96σ genau 95% aller Werte liegen /9/.

σ = 125 Skt

$\bar{N}$ - 1,96σ = 12o9

$\bar{N}$ + 1,96σ = 1699

4.2. Möglicher Einfluß der Strahlenqualität auf die Statistische Verteilung

Versuchsbedingungen (vgl. Abschnitt 4.1.):
Röhrenspannung: 25o kV, Gesamtfilterung: 2 mm Cu, Röhrenstrom: 14 mA, eingestrahlte Dosis: 2o R.
Die Gruppen aus Abschn. 4.1. wurden getrennt bestrahlt und die Mittelwerte der einzelnen Gruppen $\bar{N}_1^{25o}$ bis $\bar{N}_7^{25o}$ berechnet und mit den Mittelwerten der 7 Gruppen aus Abschn. 4.1. $\bar{N}_1^{1oo}$ bis $\bar{N}_7^{1oo}$ verglichen (Abb. 1b, Gruppe 7 wurde wegen zu geringer statistischer Relevanz nicht berücksichtigt).
Bei konstantem Verhalten der TLD's gegenüber Strahlenqualtitätsänderungen müßte die Art der Auftragung der Abb.2 eine Gerade ergeben.

4.3. Abhängigkeit des Ansprechvermögens von der Strahlenqualität

Zunächst wurde in erster Näherung angenommen, daß die TLD's keine individuellen Unterschiede in ihrem Ansprechvermögen aufweisen. (Genaueres darüber ist in Abschn. 4.7. dargestellt.)

Unter Ansprechvermögen versteht man hier die am TLD- Auswertegerät angezeigten Skt, bezogen auf die eingestrahlte Dosis (hier in R), unter Kalibrierfaktor denjenigen Faktor, mit dem man die Anzeige am TLD- Auswertegerät in die Einheit der Ionendosis (R) umrechnen kann.
Die Strahlenqualität wird repräsentiert durch die Form der Intensitätsverteilung der Röntgenbremsstrahlung in Abhängigkeit von ihrer Energie (" Röntgenbremsstrahlungsspektrum").
Durch Änderung der Röhrenspannung und/oder der Filterdikke bzw. des Filtermaterials kann die Strahlenqualität variiert werden.

a) Zunächst wurde die nach DIN 6800, Bl.2, Tab.3a /10/ als Normalstrahlung bezeichnete Strahlenqualität gewählt (Tab. 2a).
Hinzu kamen für den niederenergetischen Bereich Strahlenqualitäten, die sich an diejenigen des Oberflächentherapieröntgengerätes DERMOPAN der Fa. Siemens orientierten (Tab. 2b).
Die Messungen bei Röhrenspannungen von 20 bis 80 kV wurden mit der W-Kammer, diejenigen bei höheren Röhrenspannungen mit der N-Kammer durchgeführt.

Die nachfolgende Tab.3 zeigt entsprechende Meßergebnisse für Strahlenqualitäten, die nach den Erfahrungen der ZfS (Betreuung von ca. 200 Röntgentherapieeinrichtungen im Land NW) im praktischen Bereich der konventionellen Röntgenstrahlentherapie möglich und üblich sind.
Bezüglich Begriffe und Benennungen wird auf die DIN 6814 verwiesen /11/.

Röhren-spannung (kV)	Filterung (mm)	HWSD (mm Cu)	eingestrahlte Dosis (R)	TLD-Anzeige (Skt)	Kalibrierfaktor f (R/Skt)
6o	1,8 Al	o,o54	22,6	142o	o,o159
8o	1,8 Al	o,o81	45,2	3o28	o,o149
8o	1,8 Al	o,o81	2o	151o	o,o132
1oo	o,2 Cu+ 2,7 Al	o,3	1o	675	o,o148
15o	o,5 Cu+ 2,7 Al	o,87	1o	633	o,o158
2oo	o,8 Cu+ 2,7 Al	1,75	1o	59o	o,o169
25o	1,1 Cu+ 2,7 Al	2,45	1o	6o6	o,o165
3oo	1 Pb+1 Cu + 2 Al	6	1o	547	o,o183

Tab. 2a Ansprechvermögen der TLD's bei Normalstrahlung
(HWSD = Halbwertsschichtdicke)

Röhren-spannung (kV)	Filterung (mm)	HWSD (mm Cu)	eingestrahlte Dosis (R)	TLD-Anzeige (Skt)	Kalibrierfaktor f (R/Skt)
2o			45,2	1279	o,o353
3o	o,3 Al	o,oo58	22,6	1117	o,o2o2
4o	o,6 AL	o,o133	22,6	1258	o,o179
5o	1 Al	o,o262	22,6	1464	o,o154

Tab. 2b Ansprechvermögen der TLD's bei Strahlenqualitäten
im niederenergetischen Bereich

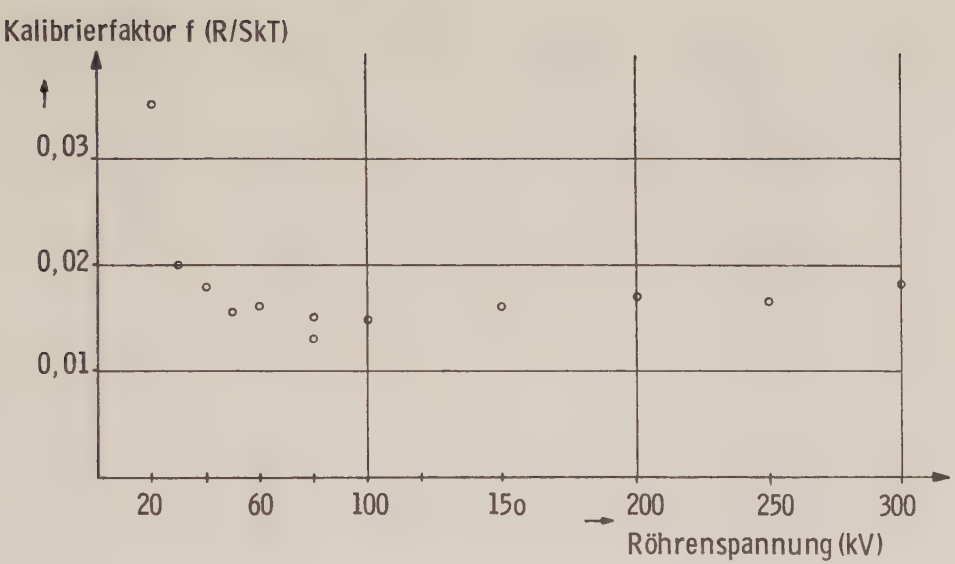
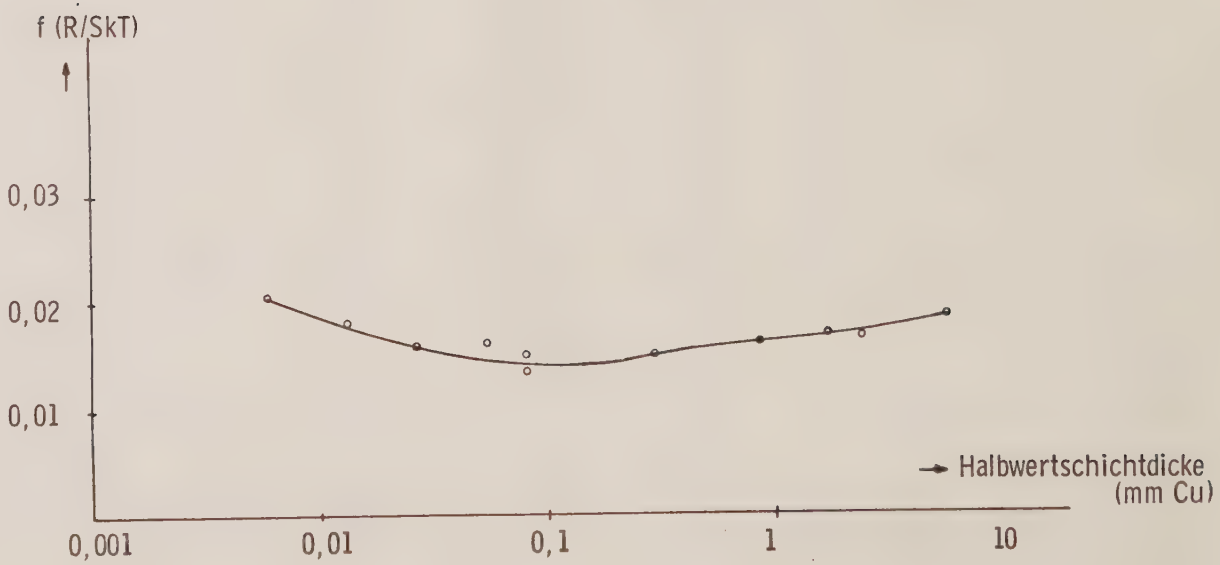


Abb. 2a : Abhängigkeit des Kalibrierfaktors f von verschiedenen Strahlenqualitäten, die durch die Angabe der Röhrenspannung repräsentiert werden. (Strahlenqualitäten nach Tab. 2a und 2b siehe auch S. 13)

Abb. 2b : Abhängigkeit des Kalibrierfaktors f von verschiedenen Strahlenqualitäten, die durch die Halbwertschichtdicke repräsentiert werden. (Strahlenqualitäten nach Tab. 2a und 2b; siehe auch S. 13, die Abszisse ist logarithmisch unterteilt)



Röhren-spannung (kV)	Filterung (mm)	HWSD (mm Cu)	einge-strahlte Dosis (R)	TLD-Anzeige (Skt)	Kalibrier-faktor f (R/Skt)
2o kV	o,6 Al	o,oo76	22,6	1o62	o,o2128
	o,4 Al	o,oo54	22,6	1o83	o,o2o87
	o,2 Al	o,oo32	33,9	1324	o,o256o
	o,1 Al	o,oo17	45,2	149o	o,o3o34
			79,1	1946	o,o4o65
3o kV	1 Al	o,o166	22,6	1344	o,o1682
	o,6 Al	o,o1	33,9	18o7	o,o1876
	o,4 Al	o,oo75	33,9	1677	o,o2o21
	o,2 Al	o,oo38	45,2	182o	o,o2484
	o,1 Al	o,oo22	113	4171	o,o27o9
4o kV	1,8 Al	o,o35	22,6	1456	o,o1552
	1,o Al	o,o22	22,6	14o9	o,o16o4
	o,6 Al	o,o13	33,9	1962	o,o1728
	o,4 Al	o,o88	45,2	2199	o,o2o56
	o,2 Al	o,oo45	56,5	2384	o,o237o
5o kV	2,o Al	o,o48	22,6	13o9	o,o1727
	1,8 Al	o,o45	22,6	1344	o,o1682
	1,o Al	o,o262	33,9	2o49	o,o1654
	o,6 Al	o,o157	45,2	2742	o,o1648
	o,4 Al	o,1	56,5	2996	o,o1898

6o kV	Filterung (mm)	HWSD (mm Cu)	eingestrahlte Dosis (R)	Skt	f (R/Skt)
	o,1 Cu		22,6	1256	o,o1799
	2,o Al	o,o586	22,6	1428	o,o1583
	1,8 Al	o,o538	33,9	2147	o,o1579
	1,o Al	o,o28	45,2	2841	o,o1591
	o,6 Al	o,o19	56,5	332o	o,o17o2
9o kV	W-Kammer				
	o,2 Cu		22,6	1253	o,o18o4
	o,1 Cu		22,6	1342	o,o1684
	2,o Al	o,o89	45,2	2779	o,o1626
	1,8 Al	o,o82	56,5	3572	o,o1582
	1,o Al	o,o46	67,8	4o83	o,o1661
9o kV	N-Kammer				
	o,2 Cu		23	144o	o,o1597
	o,1 Cu		23	1497	o,o1536
	2,o Al	o,o89	46	3o41	o,o1513
	1,8 Al	o,o82	56,5	3846	o,o1469
	1,o Al	o,o46	78	5256	o,o1484
1oo kV	o,3 Cu	o,25	23	14o4	o,o1638
	o,2 Cu	o,2	23	1412	o,o1629
	o,1 Cu	o,1	34	2o9o	o,o1627
	2,o Al	o,o992	51,52	3284	o,o1561
	1,8 Al	o,o924	56,5	3773	o,o1497

Tab. 3a *Ansprechvermögen der TLD's auf bei Oberflächen- und Halbtiefentherapie mögliche und übliche Strahlenqualitäten. Bei Röhrenspannungen von 2o bis 9o kV wurde die W-Kammer, ab 9o kV die N-Kammer benutzt.*

12o kV	Filterung (mm)	HWSD (mm Cu)	eingestrahlte Dosis (R)	Skt	f (R/Skt)
	o,2 Cu	o,25	23	1416	o,o1624
	4,o Al	o,19	34	22o3	o,o1543
	3,o Al	o,142	46	3oo5	o,o1531
	2,o Al	o,118	56,5	3638	o,o1553
15o kV	o,5 Cu	o,8	23	1329	o,o1731
	o,2 Cu	o,4	34	2o69	o,o1643
	4,o Al	o,323	46	2879	o,o1598
	3,o Al	o,235	56,5	3688	o,o1532
2oo kV	o,7 Cu	1,25	23	1296	o,o1775
	o,6 Cu	1,15	34	1896	o,o1773
	o,5 Cu	1,o5	46	2715	o,o1694
	o,4 Cu	o,9	56,5	3375	o,o1668
25o kV	1,5 Cu	2,37	23	126o	o,o1825
	1,o Cu	2,o	34	1849	o,o1839
	o,7 Cu	1,67	46	2431	o,o1892
	o,5 Cu	1,4	46	2421	o,o19oo
3oo kV	2,o Cu	3,1	23	1248	o,o1843
	1,5 Cu	2,8	34	18o6	o,o1883
	1,o Cu	2,3	46	2463	o,o1868
	o,7 Cu	1,975	56,5	3194	o,o1769

Tab. 3b *Ansprechvermögen der TLD's auf bei Tiefentherapie und mögliche und übliche Strahlenqualitäten.*
Die HWSD wurde aus Tabellen von Wachsmann/Dimotis /12/ und vom British Journal of Radiology /13/ entnommen.

Die Abb. 2a und 2b zeigen die Auftragung des Kalibrierfaktors f gegen die Röhrenspannung bzw. gegen die Halbwertschichtdicke bei DIN-Strahlenqualitäten.
In Abb. 3a und 3b ist der Kalibrierfaktor f gegen die Röhrenspannung bzw. Halbwertschichtdicke bei möglichen und üblichen Strahlenqualitäten in der Oberflächen-, Halbtiefen- und Tiefentherapie aufgetragen. Parameter in Abb. 2a und 3a ist die Gesamtfilterung.

4.4. Abhängigkeit der Meßwertanzeige von der Zeitspanne zwischen Bestrahlung und Auswertung

Untersuchungen in dieser Hinsicht sind insofern von Bedeutung, als die TLD's von der ZfS per Post an die Betreiber von Röntgentherapieeinrichtungen geschickt, dort bestrahlt und zur Auswertung wieder an die Zfs zurückgesandt werden. Unvermeidlich sind dabei unterschiedliche Zeitspannen zwischen Bestrahlung und Auswertung, die unter Umständen die Meßergebnisse beeinflussen können.
Abb.4 zeigt daher die Auftragung der Mittelwerte von jeweils sechs gleichartig bestrahlten und danach behandelten TLD's gegen unterschiedliche Zeitspannen zwischen Bestrahlung und Auswertung.
Die maximalen Abweichungen vom Gesamtwert reichen von -4% bis +7%. Erst eine Liegezeit von 5 Wochen nach Bestrahlung zeigt eine von diesen Grenzen deutlich abweichende Reduzierung des Meßwertes, die durch Fading zu erklären ist.

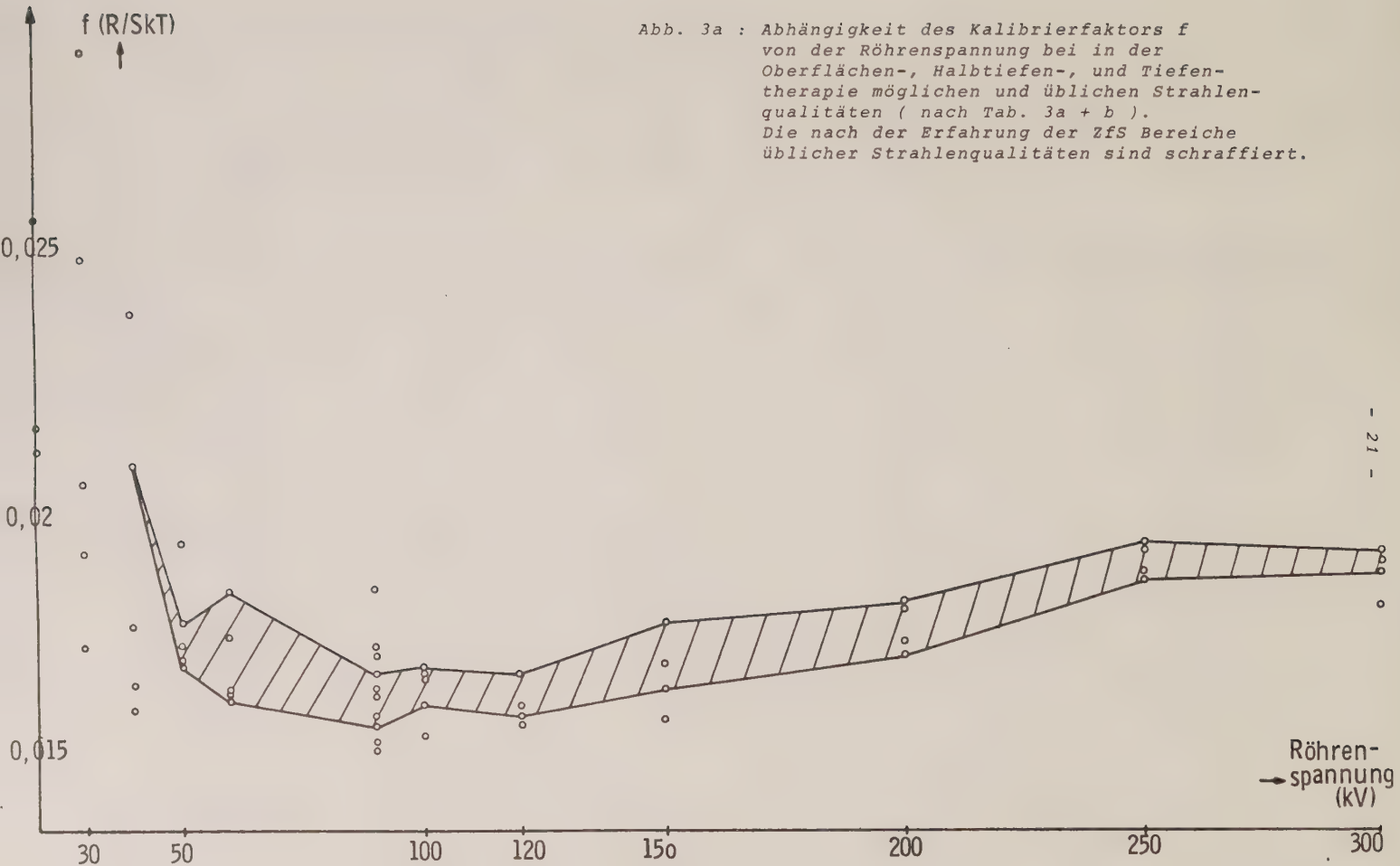


Abb. 3a : Abhängigkeit des Kalibrierfaktors f von der Röhrenspannung bei in der Oberflächen-, Halbtiefen-, und Tiefentherapie möglichen und üblichen Strahlenqualitäten (nach Tab. 3a + b). Die nach der Erfahrung der ZfS Bereiche üblicher Strahlenqualitäten sind schraffiert.

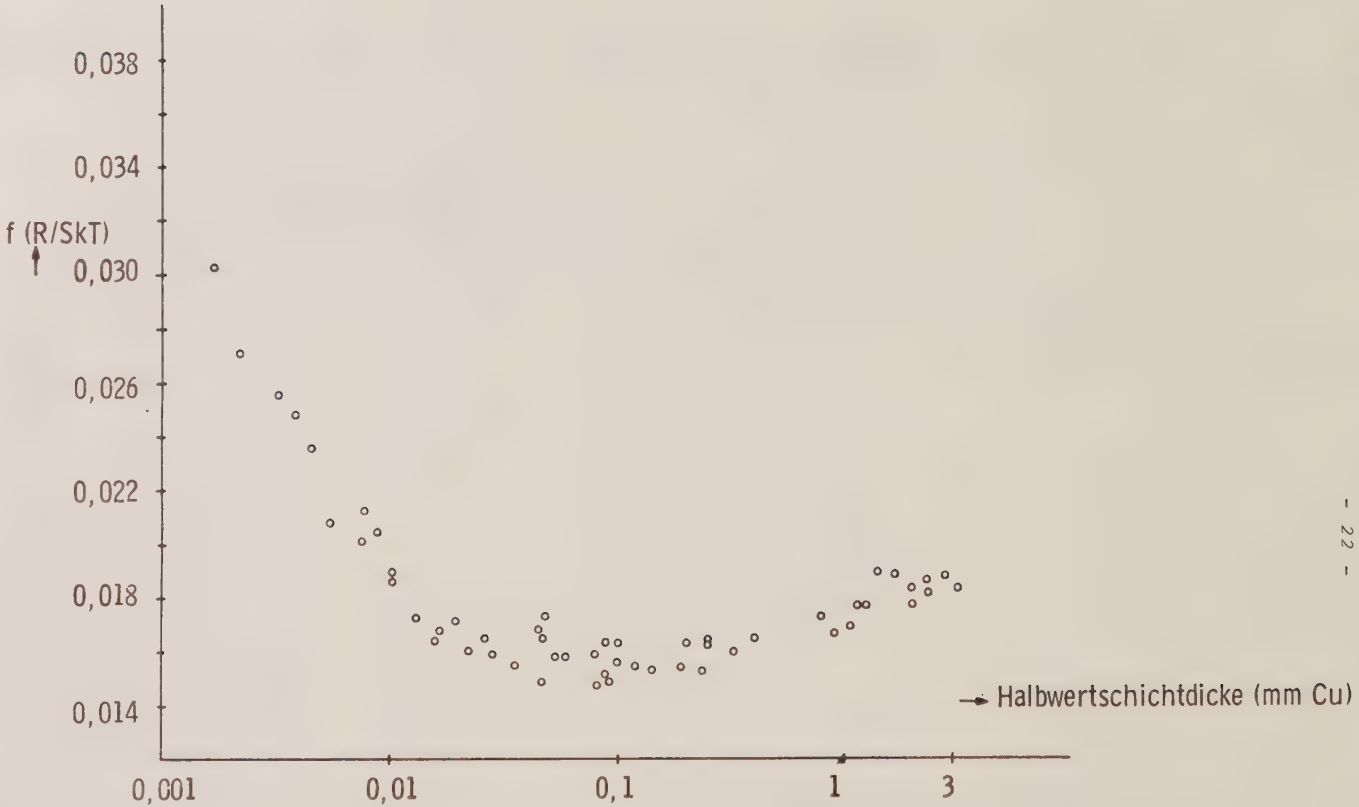


Abb. 3b : Abhängigkeit des Kalibrierfaktors f von der Halbwertschichtdicke bei in der Oberflächen-, Halbtiefen-, und Tiefentherapie möglichen und üblichen Strahlenqualitäten.
(Strahlenqualitäten nach Tab. 3a und 3b; die Abszisse ist logarithmisch unterteilt)

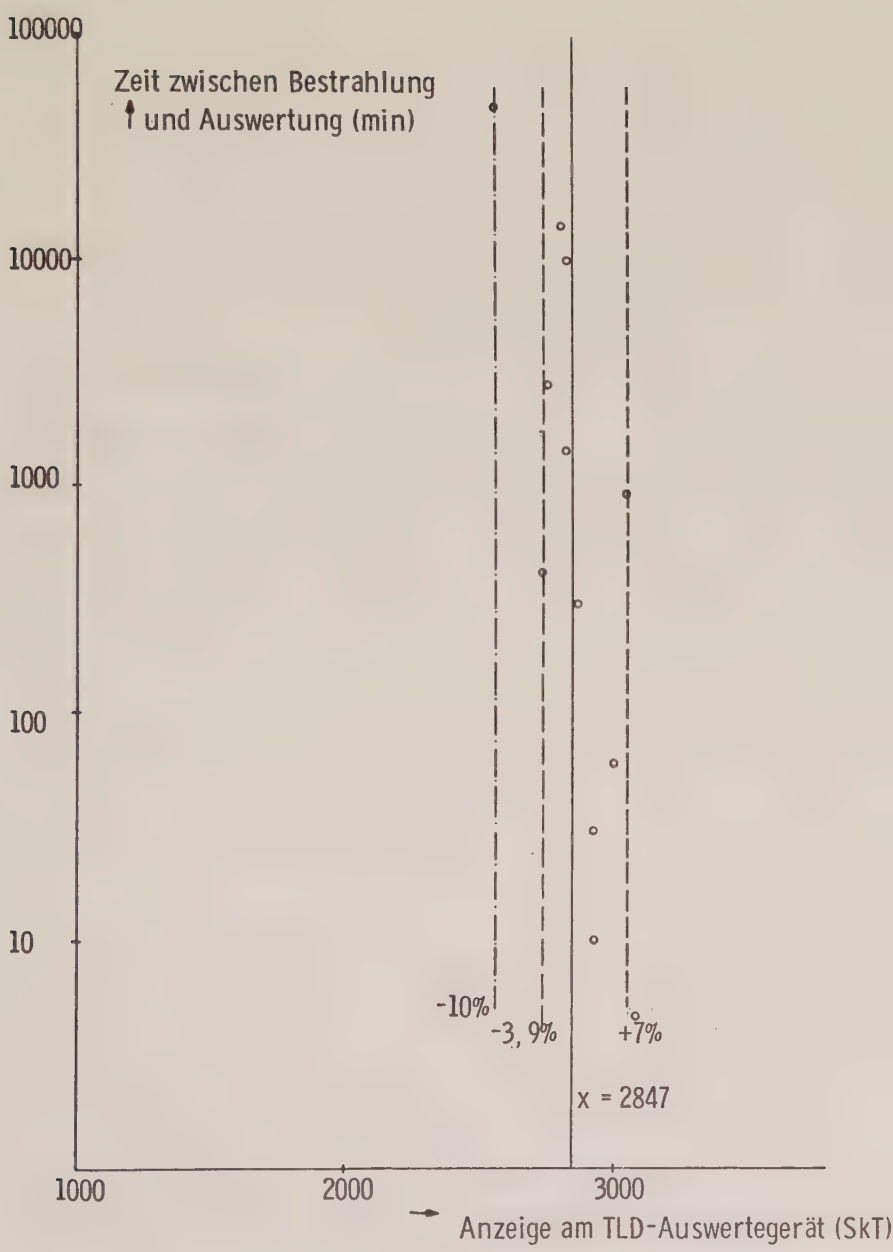


Abb. 4 : Abhängigkeit der Meßwertanzeige von der Zeitspanne zwischen Bestrahlung und Auswertung.
(Strahlenqualität: 100 kV, 0,6 mm Cu + 2,7 mm Al; applizierte Dosis: 50 R)

4.5. Wiederverwendungsmöglichkeit der TLD's

Ein wesentlicher Beitrag zur Reduzierung der halbjährlich anfallenden Kosten für die Dosimetrierung ist die Möglichkeit, ein und dasselbe TLD sehr oft wiederzuverwenden. Um das Verhalten der Dosimeter bei wiederholendem Einsatz und die dazu notwendigen Behandlungsweisen zu testen, wurde nach zwei Verfahren vorgegangen:

a) Ohne Regenerierung: Zwar wird durch das Auswerteverfahren die Dosisinformation weitgehend gelöscht, doch es verbleibt eine gewisse Restinformation, die abhängig ist von der Höhe der ursprünglich auf das TLD applizierten Dosis (nach Becker und Scharmann /7/ 2 bis 5%). Nach mehrmaligem Gebrauch müßte sich vor Bestrahlung eine Art Vordosis aufbauen, die das Meßergebnis verfälschen würde.

b) Mit Regenerierung: Nach dem Auswerten schließt sich üblicherweise die Regenerierung an, so daß alle TLD's wieder das gleiche Ausgangsniveau bei minimaler Vordosis erreichen.

Im Verlaufe der Regenerierung werden die TLD's zunächst 1 h lang auf 4oo° C und dann 2 h lang auf 1oo° C aufgeheizt.

Abb. 5 zeigt für 1o Messungen (bei einer Röhrenspannung von 3oo kV, einer Gesamtfilterung von o,5 mm Cu und einer Dosis von 5oo R) die Meßwerte mit und ohne Regenerierung der TLD's. Ein Meßwert ergibt sich jeweils aus den Mittelwerten von 7 bzw. 8 TLD-Anzeigen.

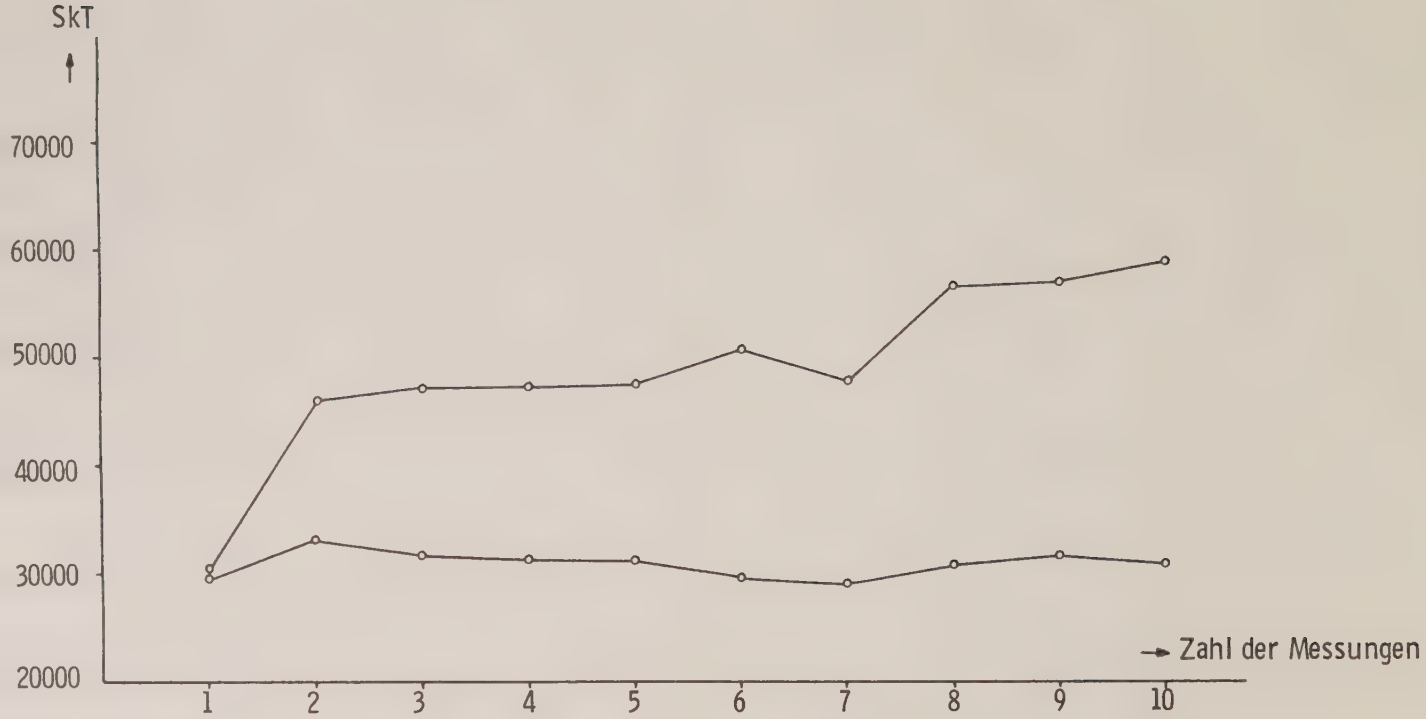


Abb. 5 : Verhalten der TLD-Anzeige bei Nicht-Regenerierung bzw. bei Regenerierung nach jeder Messung. (Strahlenqualität: 3oo kV, o,4 mm Cu, applizierte Dosis: 5oo R)

4.6. Dosisleistungsabhängigkeit des Meßwertes

In der Strahlentherapie werden je nach Indikationsstellung die Dosen mit verschiedenen Dosisleistungen appliziert ("Protrahierung"). Wird mit TL-Dosimetern dosimetriert, muß sichergestellt sein, daß gleiche Dosen bei unterschiedlicher Einstrahlungszeit gleiche Anzeigen am Auswertegerät ergeben.
In Abb. 6 ist die Dosisanzeige am TL-Auswertegerät in Abhängigkeit von der Dosisleistung graphisch dargestellt. Die unterschiedlichen Dosisleistungen wurden bei Konstanthaltung der Bestrahlungszeit durch Variation des Röhrenstroms eingestellt.
(Strahlenqualität: Röhrenspannung: 15o kV, Gesamtfilterung: 2,5 mm Be).

4.7. Individuelles Ansprechvermögen der TL-Dosimeter

Bei Vorliegen eines unterschiedlichen individuellen Ansprechvermögens der einzelnen TLD's auf Photonenstrahlung würde die praktische Ausführung des § 13 Abs.1 der RöV mittels TLD's bei so vielen Betreibern von Röntgentherapieeinrichtungen schwierig sein, da für jedes Dosimeter die in Abschnitt 4.3. beschriebenen Kalibrierfaktoren bestimmt und nachvollzogen werden müßten und nicht pauschal für ein bestimmtes Kollektiv.
Zu diesem Zweck wurde das Verhalten in dieser Hinsicht von 3o TL-Dosimetern bei 1o Bestrahlungen mit einer Dosis von 1oo R bei einer Röhrenspannung von 2oo kV und einer Gesamtfilterung von o,4 mm Cu und o,2 mm Al untersucht. Nach jeder

Auswertung wurde regeneriert. Alle anderen Parameter blieben konstant.

Um den Einfluß unvermeidbarer systematischer Fehler, bedingt durch die Versuchsbedingungen, zu reduzieren, wurden die Meßwertanzeigen (in Skt) der TLD's Nr.2 bis Nr.3o jeweils auf die Meßwertanzeige der TLD's Nr.1 bezogen (Abb.7). In Abb.7 ist auch der Verlauf der Meßwertanzeige des TLD's Nr.1 für 1o Bestrahlungen unter konstanten Bedingungen aufgetragen.

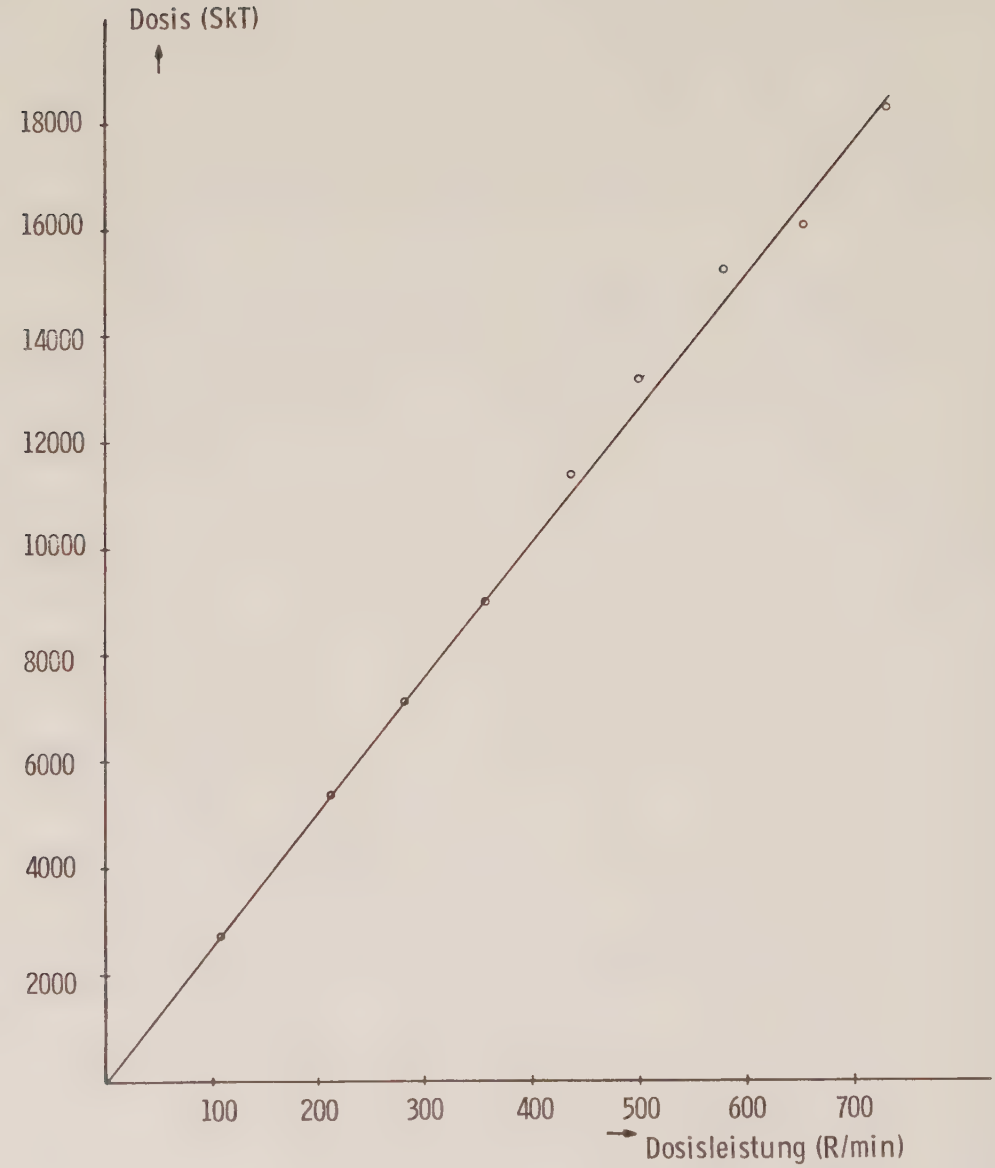


Abb. 6 : Abhängigkeit der in SkT am TL-Auswertegerät angezeigten Dosis von der Dosisleistung (R/min)

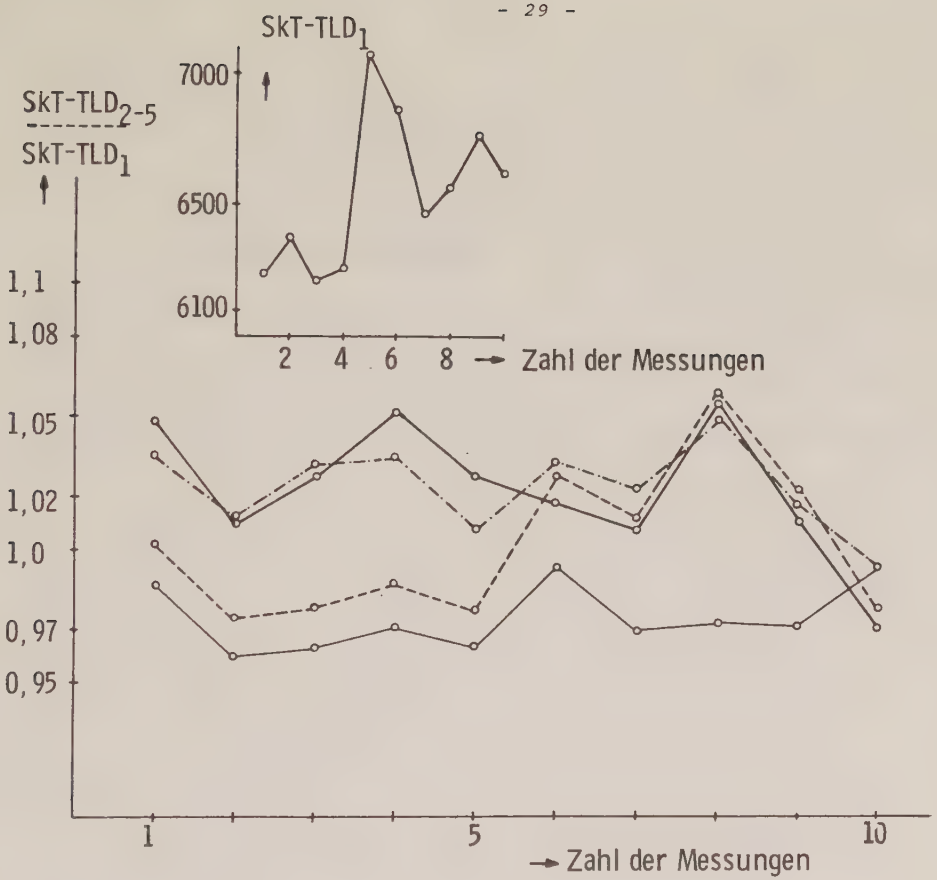


Abb. 7 : Verhalten der TLD-Anzeige ("SkT-TLD") von 3o willkürlich ausgesuchten Dosimetern bei 1o sich unter konstanten Bedingungen wiederholenden Messungen.
Um unvermeidliche systematische Fehler (bedingt durch den Versuchsaufbau) auszuschließen, wurden die Meßwertanzeigen der TLDs 2 bis 3o auf diejenige des TLDS 1 bezogen (als Beispiel hier die Kurven der TLDs 2 bis 5)
Als Beispiel für die sich ähnelnden Kurvenläufe steht der Kurvenlauf des TLD 1.

5. Diskussion

Das den Versuchen zugrunde liegende Kollektiv von etwa 78o TL-Dosimetern erfüllt die Bedingungen einer Normalverteilung insofern, als über 95% aller Werte im Intervall $\bar{N}-1{,}96$, $\bar{N}+1{,}96$, also im Intervall von 12o9 Skt bis 1699 Skt liegen.

Die Standardabweichung beträgt für Messungen zu § 13 Abs.1 RöV mit TLD's $\pm$ 8,5%. Dies ist höher als für Messungen mit den üblichen Ionisationskammersystemen. Hier liegen die Werte für bei $\pm$ 3% bis $\pm$ 5%.

Dem wird dadurch Rechnung getragen, daß die Erst- und Nachdosimetrierungen durch die ZfS nach folgendem Schema ablaufen:

a) die Erstdosimetrierung nach § 13 Abs.1 RöV wird nur mit einem Ionisationskammersystem durchgeführt.

b) halbjährliche Überprüfungen der Erstdosimetrierung mit TLD's.

c) ungefähr alle 2 Jahre oder bei großen Abweichungen der TLD-Meßergebnisse erneute Messungen mit dem Ionisationskammersystem.

Hätte sich diesselbe statistische Verteilung wie in Abb.1 auch bei Bestrahlung mit einer anderen Strahlenqualität ergeben, wäre dies ein Hinweis, daß das statistische Verhalten der TLD's unabhängig von der Strahlenqualität ist. In diesem Fall müßte sich bei Auftragung der Mittelwerte der 7 Gruppen gegeneinander eine Gerade ergeben.

Dies ist zwar in der Tendenz, nicht jedoch exakt erfüllt (vgl. Abb.2). TL-Dosimeter zeigen demnach eine individuell

etwas unterschiedliche Empfindlichkeit für verschiedene Strahlenqualitäten. Die Konsequenz, die sich daraus für den praktischen Einsatz ergibt, ist die sich laufend wiederholende Bestimmung der Empfindlichkeit von 2o bis 3o zufällig ausgewählten TL-Dosimetern aus dem Gesamtkollektiv nach jeder Regenerierung.

Die Abb. 2a und 2b zeigen, inwieweit die Empfindlichkeit, ausgedrückt durch den Kalibrierfaktor f, von der Strahlenqualität (nach Tab. 2a und 2b) abhängt. Die Strahlenqualität wird durch Röhrenspannung, Filterdicke und -material bestimmt. Ein Maß für die Strahlenqualität stellt die Halbwertsschichtdicke dar. In den Abb. 3a und 3b ist der Kalibrierfaktor f gegen die Röhrenspannung bzw. gegen die Halbwertsschichtdicke aufgetragen (Strahlenqualität nach Tab.3a und 3b).

Im niederenergetischem Bereich, d.h. im Bereich der Oberflächen- und z.T. der Halbtiefentherapie, ist die Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Strahlenqualität groß, im höherenergetischen Bereich, d.h. im Bereich der Tiefentherapie, wird sie kleiner.

Der schraffierte Bereich in der Abb. 3a stellt die Variationsbreite der Filterdicken und -materialien sowie der Röhrenspannung dar, die von der ZfS bei ihrer Betreuung der Röntgentherapieeinrichtungen im Land NW angetroffen wird.

Im Bereich der Oberflächentherapie bis 5o kV ist die Variationsbreite sehr gering, so daß sehr wenige Probleme mit der Bestimmung der von der Filterung abhängigen Kalibrierfaktoren bestehen.

Etwas anderes ist die Situation im Halbtiefenbereich, d.h. von 6o kV bis 1oo kV. Hier sind durchaus für eine bestimmte Röhrenspannung unterschiedliche Kalibrierfaktoren zu benutzen.

In Abb.4 ist die TL-Anzeige in Skt gegen die Zeit zwischen Bestrahlung und Auswertung aufgetragen. Innerhalb eines Zeitraumes von 2 Wochen ergaben sich Schwankungen in der Anzeige zwischen -4% und +7% um den Mittelwert. Dieser Zeitraum beeinflußt also die Empfindlichkeit der TLD's und damit das Dosimetrierungsergebnis praktisch nicht.
Erst nach 5 Wochen scheint sich ein Fadingeffekt bemerkbar zu machen, was in diesem Zusammenhang allerdings nur von theoretischem Interesse ist, da Zeitspannen von über 2 Wochen zwischen Bestrahlung und Auswertung kaum vorkommen.

Wichtige Schlußfolgerungen für die praktische Handhabung ergeben sich aus der Abb.5:

a) Eine Wiederverwendung der TLD's für erneute Messungen ist möglich. Dies zeigt der Verlauf der unteren Kurve, die maximale Abweichungen von -5% bis +7,1% um ihren Mittelwert aufweist.

b) An jede Auswertung muß sich eine Regenerierung zur Löschung der verbleibenden Restintensität anschließen (Aufbaueffekt: Anstieg der Meßwertanzeige auf über 9o% innerhalb von 1o Messungen).

Bestrahlungen mit ionisierenden Strahlen werden fraktioniert und protahiert vorgenommen, d.h. die zu verabfolgende Gesamtdosis wird auf kleinere Einzeldosen aufgeteilt,

diese wiederum mit einer bestimmten und nicht mit der maximal möglichen Dosisleistung appliziert.
Die Größenordnung der von einem TL-Dosimeter angezeigten Dosis muß daher unabhängig davon sein, in welcher Zeit letztere eingestrahlt worden ist.
In Abb.6 sind die in der Strahlentherapie üblichen Dosisleistungen gegen die Dosisanzeige aufgetragen. Die Abb. zeigt eine ausreichende Unabhängigkeit der Dosisanzeige von der Dosisleistung, repräsentiert durch die von der Gerade kaum abweichenden Meßpunkte.

Die praktische Durchführung von TLD-Dosimetrierungen würde entscheidend erleichtert, wenn die individuellen Empfindlichkeiten der einzelnen Dosimeter nicht so sehr unterschiedlich wären. Dieses Verhalten wurde für 1o Messungen an 3o zufällig ausgewählten Exemplaren untersucht und in Abb.7 aufgetragen.
TLD 1 dient sozusagen als "Standard", auf dessen Meßwert alle anderen bezogen wurden, um äußere Unregelmäßigkeiten am Versuchsaufbau etc. auszuschließen. Daß dies erforderlich war, zeigt die Teilabbildung in Abb.7 für die Meßergebnisse des TLD 1, deren große Schwankungen nicht TLD-spezifisch ist, da alle anderen TLD's qualitativ denselben Schwankungen unterworfen waren.
Insgesamt lag die Summe der Abweichungen aller untersuchten TLD's im Bereich von -11% bis +15% vom gemeinsamen Mittelwert (aller 3oo Messungen).

Diese maximalen Abweichungen werden in der Praxis noch dadurch verkleinert, daß man für eine Messung nicht wie hier ein einzelnes TLD gebraucht, sondern daß eine Einheit aus drei TLDs verwendet und daraus der Mittelwert gebildet wird. Man darf also für die Praxis durchaus gleiche TLD-Empfindlichkeiten voraussetzen.

Die ZfS geht seit einiger Zeit nach den in dieser Arbeit aufgestellten Ergebnissen vor und erzielt eine gute Überwachung der Röntgengeräte bei gleichzeitiger Kosten-, Aufwand- und Zeitersparnis.

Zusammenfassung

LiF besitzt die Eigenschaft, nach Bestrahlung mit ionisierenden Strahlen, bei thermischer Stimulierung sichtbares Licht zu emittieren, dessen Intensität der eingestrahlten Dosis weitgehend proportional ist.
Dabei ist es unerheblich, in welcher Zeit eine bestimmte Dosis eingestrahlt wird. Die aufgenommene Dosis wird für längere Zeit ohne Verlust gespeichert. Nach Abrufen der Dosisinformation muß sich eine Regenerierung anschließen, die das TLD wieder auf Null-Niveau bringt.
Allerdings zeigen TLD's nicht exakt gleiche Empfindlichkeiten (ausgedrückt durch den Kalibrierfaktor f = eingestrahlte Dosis (R)/ angezeigte Skalenteile) für verschiedene Strahlenqualitäten.

All dies bedingt folgenden Ablauf für Dosismessungen gemäß § 13 RöV:

a) die Erstdosimetrierung wird mit einem Ionisationskammersystem durchgeführt
b) halbjährige Oberprüfung der Erstdosimetrierung mit TLD's
c) aus dem Gesamtkollektiv werden nach jeder Regenerierung 20-30 TLD's zufällig ausgewählt und bei verschiedenen Strahlenqualitäten die Empfindlichkeit bestimmt
d) ungefähr alle 2 Jahre oder bei großen Abweichungen der TLD-Meßergebnisse erneute Messungen mit dem Ionisationskammersystem

LITERATUR

(1) RöV § 13 Abs. 1 und 2

(2) Rheinisches Ärzteblatt, Heft 6/1979, S. 187/188

(3) Röntgenpraxis, Heft 8/1977, S. 215 bis 217

(4) Richtlinien für die Anschlußmessungen nach § 13 Abs. 2 der RöV
2. Bek. des BMJFG und des BMA vom 15.3.1974

(5) Rheinisches Ärzteblatt, Heft 15/1976, S. 513 bis 515

(6) Medizinische Physik 198o, Band 1, S. 111 bis 115

(7) Becker, Scharmann: Einführung in die Festkörperdosimetrie
Karl- Thiemig- Verlag- München, Juni 1975, S. 31ff

(8) Panzer und Regulla: Festkörperdosimetrie im medizinischen Bereich, I. Dosimetrische Grundlagen
Röntgenpraxis, Jahrg. 29, Heft 7 (1976), S. 154 bis 162

(9) Sachs: Statistische Methoden, Springer Verlag

(1o) DIN 68oo: Dosismeßverfahren in der radiologischen Technik, Bl. 2, Tab. 39: Ionisationsdosimetrie

(11) DIN 6814: Begriffe und Benennungen in der radiologischen Technik, Teil 2: Strahlenphysik, Jan. 198o

(12) F. Wachsmann und A. Dimotis: Kurven und Tab. für die Strahlentherapie, S. 36 bis 43
S. Hirzel-Verlag Stuttgart, 1957

(13) British Journal of Radiology: Supple No. 11, Central Axis Depth Dose Data for Use in Radiotherapie, London 1972
Section 1, Fig.1.1

Danksagung

Herrn Prof. Dr. med. D. Günther möchte ich sehr danken für die Überlassung des Themas und für die Bereitschaft, mir mit seinem Rat zur Seite zustehen.

Herrn Dr. Ewen danke ich für die eingebrachten Ideen und für die jederzeit gewährte freundliche Unterstützung, die für mich eine große Hilfe bedeutete.

Frau Teubert möchte ich danken für den geleisteten Beistand ebenso Frau Düsing, für die bereitwillige Übernahme der Schreibarbeiten.

Lebenslauf

Name	:	Quast
Vornamen	:	Hans Wilhelm
geb.	:	12.o8.57 in Schledehausen
Eltern	:	Dr. Walther Quast
		geb. 17.o2.27
		Gesine Quast geb. Rost
		geb. 16.o7.29
Schulen	:	Volksschule Schledehausen
		April 1964 - Juli 1967
		Ratsgymnasium Osnabrück
		August 1967 - Mai 1976
Medizin Studium	:	Universität Düsseldorf
		immatrikuliert WS 76/77